



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.354.342.1; 621.315.592

ЕМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР ИЗ ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА

В. Т. ФАМ, С. Е. МАКСИМОВ, Е. А. УТКИНА, Е. Б. ЧУБЕНКО, В. Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 29.07.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Скоростным осаждением графитоподобного нитрида углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) из меламина на подложки из кремния (Si) и алюминия (Al), часть поверхности которых была покрыта оксидом – соответственно SiO_2 или Al_2O_3 , с поверхностными пленочными контактами из Al изготовлены структуры Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Si/Al, Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /SiO₂/Si/Al, Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Al и Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Al₂O₃/Al. На них при комнатной температуре измерены вольт-фарадные характеристики и зависимость емкости от частоты измерительного сигнала. Установлено, что диэлектрическая проницаемость $g\text{-C}_3\text{N}_4$ составляет 14 в структурах на кремнии и 9–10 в структурах на алюминии. Уменьшение диэлектрической проницаемости объясняется образованием Al_2O_3 на границе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Al в процессе осаждения $g\text{-C}_3\text{N}_4$, на что указывают результаты проведенного рентгенодифракционного анализа сформированных образцов.

Ключевые слова: пленка, нитрид углерода, оксид алюминия, оксид кремния, емкость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках задания 1.4 Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии». Авторы благодарят Д. И. Тишкевич за рентгенодифракционный анализ экспериментальных образцов.

Для цитирования. Емкостные свойства пленочных структур из графитоподобного нитрида углерода / В. Т. Фам [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-5-13>.

CAPACITANCE OF FILM STRUCTURES INCLUDING GRAPHITIC CARBON NITRIDE

VAN T. PHAM, SERGEY E. MAXIMOV, ELENA A. UTKINA, EUGENE B. CHUBENKO,
VICTOR E. BORISENKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 29.07.2024

Abstract. Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Si/Al, Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /SiO₂/Si/Al, Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Al and Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Al₂O₃/Al structures were fabricated by rapid chemical vapor deposition of graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) from melamine onto silicon (Si) and aluminum (Al) substrates partially coated with appropriate oxide – SiO_2 or Al_2O_3 – and Al contacts deposited on the surface. Their capacitance-voltage characteristics and frequency dependence of the capacitance were measured at room temperature. It was found that the permittivity of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ is 14 in structures on silicon and 9–10 in structures on aluminum. The decrease in permittivity is explained by the formation of Al_2O_3

at the $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$ boundary during the deposition of $g\text{-C}_3\text{N}_4$, as indicated by the results of the X-ray diffraction analysis of the formed samples.

Keywords: film, carbon nitride, aluminium oxide, silicon oxide, capacitance.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The research was carried out within the framework of task 1.4 of the State Program of Scientific Research of the Republic of Belarus “Materials Science, New Materials and Technologies”. The authors thank D. I. Tishkevich for the X-ray diffraction analysis of the experimental samples.

For citation. Pham V. T., Maximov S. E., Utkina E. A., Chubenko E. B., Borisenko V. E. (2024) Capacitance of Film Structures Including Graphitic Carbon Nitride. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-5-13> (in Russian).

Введение

Графитоподобный нитрид углерода $g\text{-C}_3\text{N}_4$ рассматривается в качестве одного из перспективных материалов для устройств аккумулирования электрической энергии [1]. Особую актуальность он приобретает в связи с возможностью формирования методом химического осаждения из газовой фазы пленочных структур, состоящих из слоев этого материала нанометровой толщины [2–5]. Установлен ряд электрофизических характеристик $g\text{-C}_3\text{N}_4$, проявляющего свойства анизотропного полупроводника с очень низкой электропроводностью, таких как удельное сопротивление и подвижность носителей заряда [6–8]. Однако диэлектрические характеристики изготавливаемых из него наноразмерных структур мало изучены.

В этой связи цель исследований авторов – экспериментальное изучение емкостных зарядовых свойств тонкопленочных слоистых наноструктур из $g\text{-C}_3\text{N}_4$, сформированного химическим осаждением из газовой фазы на металлической (Al) и полупроводниковой (Si) подложках, а также на диэлектрических оксидных слоях (SiO_2 , Al_2O_3) на этих подложках.

Методика проведения эксперимента

В качестве исходных подложек использовали пластины диаметром 76 мм монокристаллического (111) кремния с p -типом проводимости (легирующая примесь – бор) и удельным сопротивлением 0,03 Ом·см, а также пластины размерами $70 \times 70 \times 0,1$ мм, вырезанные из алюминиевой фольги ДПРНТ 0,1×500НД 8011 (ГОСТ 618–2014), содержащей не менее 97,5 % алюминия. Поверхность подложек подвергали стандартной очистке в органических растворителях.

Оксидный слой из SiO_2 толщиной 290 нм создавали на кремниевой подложке ее термическим окислением в воздушной среде при 900 °С. После этого с половины поверхности подложки оксид стравливали в водном растворе фтористоводородной кислоты концентрацией 4,5 об.%. Слой Al_2O_3 толщиной 210 нм формировали на алюминиевой подложке ее электрохимическим окислением в водном растворе лимонной кислоты в потенциостатическом режиме при скорости развертки потенциала 1 В/с до 150 В. При этом подложку лишь до середины погружали в электролит, обеспечивая таким образом соседство областей, покрытых оксидом алюминия и свободных от него.

Пленки $g\text{-C}_3\text{N}_4$ наносили скоростным химическим осаждением из паров меламина в воздушной атмосфере при атмосферном давлении, как это описано в [5], при 575 °С в течение 5 мин на кремниевые подложки и при 550 °С в течение 3, 5 и 7 мин – на алюминиевые. При этом каждую подложку располагали над реактором так, чтобы осаждение происходило одновременно на ее поверхность, покрытую и непокрытую соответствующим оксидом. Толщины осажденного $g\text{-C}_3\text{N}_4$, оцененные в экспериментах [5], составляли 1150 нм на кремниевой и соответственно 700, 1100 и 1200 нм – на алюминиевых подложках.

Для создания электрических контактов к внешней поверхности пленки $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и к подложке их защищали механически прижатой контактной маской из железной фольги и магнетронным распылением наносили пленку алюминия толщиной порядка 100 нм. Окна в маске имели форму квадратов размерами 1×1 мм и располагались на расстоянии 12 мм друг от друга. В результате были сформированы четыре группы экспериментальных ($\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Si}/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$) и две группы контрольных пленочных структур ($\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ и $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$). Они позволяли регистрировать емкостные характеристики как собственно SiO_2 и Al_2O_3 , так и комбинированных структур $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$, $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 1).

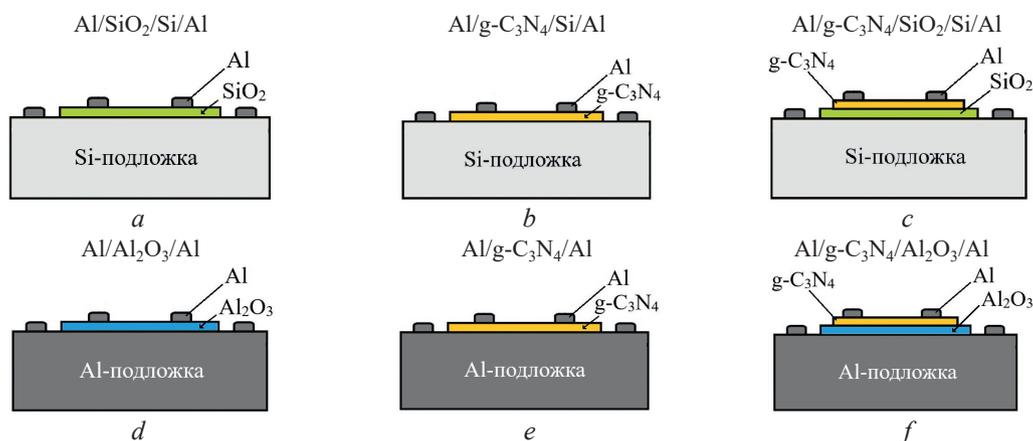


Рис. 1. Структура контрольных (*a, d*) и экспериментальных (*b, c, e, f*) образцов на кремниевой (*a, b, c*) и алюминиевой (*d, e, f*) подложках

Fig. 1. Structure of reference (*a, d*) and experimental (*b, c, e, f*) samples on silicon (*a, b, c*) and aluminum (*d, e, f*) substrates

На полученных образцах анализировали морфологию поверхности методом сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе ZEISS EVO 10 и присутствие в них кристаллических фаз методом рентгеновской дифрактометрии на рентгеновском порошковом дифрактометре POWDIX 600/300), используя для зондирования излучение CuK_α ($\lambda = 1,542 \text{ \AA}$). Исследование емкостных характеристик экспериментальных пленочных структур проводили при комнатной температуре с помощью зондового устройства и измерителя импеданса E7-25, позволявшего регистрировать емкости в диапазоне от 1 до 1000 пФ и напряжения смещений 0–10 В, а также частотные зависимости емкости в диапазоне 100 Гц–1 МГц. Измерения частотной зависимости емкости осуществляли при подаваемом на образец постоянном напряжении 0, 3 и 7 В. Оценивалось также влияние отжига при 120 °С на воздухе в течение 10 мин на контролируемые емкостные характеристики.

Результаты исследований

Все сформированные пленочные структуры имели гладкую поверхность с четкими границами контактных областей. Рентгенодифракционный анализ экспериментальных образцов обнаружил в структурах на кремнии кристаллическую фазу самого кремния (подложка) и характерный для $\text{g-C}_3\text{N}_4$ дифракционный пик отражения от плоскости (002). На дифрактограммах образцов на алюминиевых подложках (рис. 2), наряду с рефлексами от подложки и $\text{g-C}_3\text{N}_4$, зарегистрированы сигналы от кристаллических фаз Al_2O_3 . Причем эти сигналы присутствуют как на дифрактограммах, снятых на образцах, на которые $\text{g-C}_3\text{N}_4$ наносили на предварительно электрохимически окисленную алюминиевую подложку, так и на образцах, на которые $\text{g-C}_3\text{N}_4$ наносили на неокисленный алюминий.

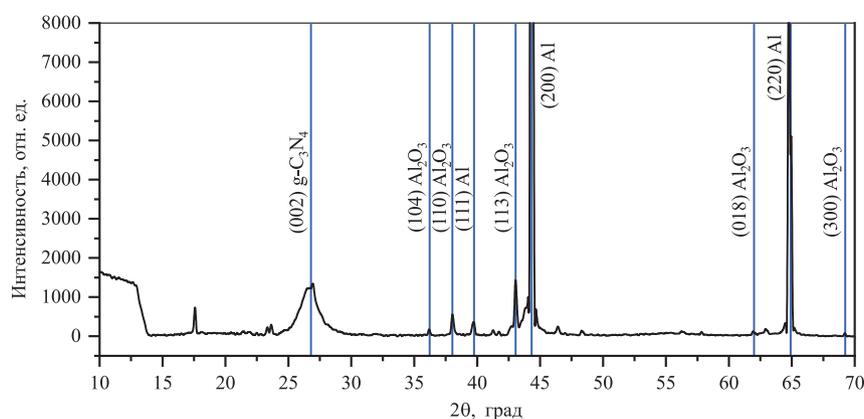


Рис. 2. Рентгенограмма образца $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$

Fig. 2. X-ray diffraction spectrum of $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$ sample

Перед регистрацией емкостных характеристик по вольт-амперным измерениям убеждались в омическом характере контактов к кремниевым и алюминиевым подложкам и проверяли структуры на электрической пробой и утечки. Установлено, что все изготовленные пленочные структуры, за исключением тех, на которых $g-C_3N_4$ осаждали на кремний ($Al/g-C_3N_4/Si/Al$), выдерживают напряжение до ± 10 В при плотности токов утечки менее 10 нА/см^2 . В названных структурах на кремнии токи оказались на три-четыре порядка больше. В дальнейшем на них емкостные измерения не проводились.

На рис. 3 приведены вольт-фарадные (C-V) характеристики, снятые на контрольной структуре, в которой присутствовал только один диэлектрик – SiO_2 , и на экспериментальной структуре с двухслойным материалом $g-C_3N_4/SiO_2$ между токоподводящими электродами.

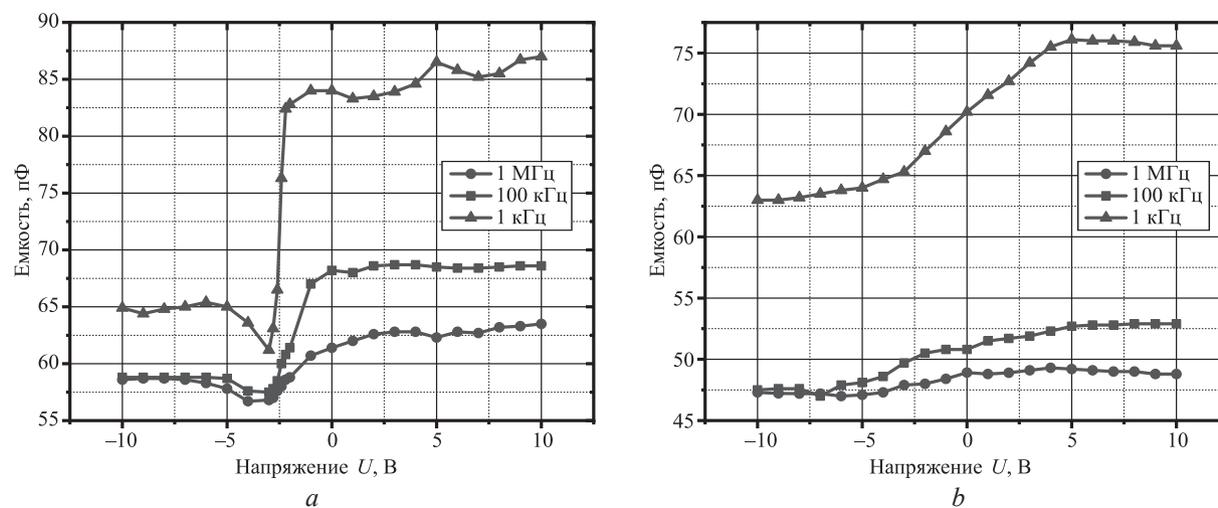


Рис. 3. C-V-характеристики контрольной $Al/SiO_2/Si/Al$ (a) и экспериментальной $Al/g-C_3N_4/SiO_2/Si/Al$ (b) пленочных структур на кремниевой подложке

Fig. 3. C-V characteristics of reference $Al/SiO_2/Si/Al$ (a) and experimental $Al/g-C_3N_4/SiO_2/Si/Al$ (b) film structures on a silicon substrate

Вид C-V-характеристики контрольной структуры является типичным для МОП-структур на кремнии [6, 7]. При положительном напряжении на Al-электроде, контактирующем с SiO_2 , емкость остается практически неизменной во всем исследованном диапазоне приложенных внешних напряжений. При смене полярности приложенного напряжения имеет место резкое уменьшение емкости в интервале от нуля до (-5) В, после которого ее значения остаются неизменными. Отмеченные особенности C-V-характеристики контрольной структуры объясняются дрейфом положительных ионов в окисле и/или перераспределением подвижных носителей заряда [8]. На границе Si/SiO_2 ионы, как правило, закреплены из-за высокой разупорядоченности окисла, а ионы, находящиеся на границе металл/окисел, могут быть подвижными. Кроме этого, эффективный заряд на границе Si/SiO_2 , влияющий на измеряемую емкость, может изменяться вследствие туннельной инжекции свободных носителей из полупроводника на ловушки на этой границе. Такой механизм становится преобладающим при отрицательных напряжениях смещения, приводя к уменьшению общей регистрируемой емкости структуры.

Отличительными особенностями C-V-характеристики экспериментальной структуры являются более низкие значения регистрируемой емкости и расширенная область монотонного изменения емкости в зависимости от приложенного напряжения. В рассматриваемом случае она симметрична относительно нуля и простирается от (-5) до $(+5)$ В, что можно связать с зарядовыми эффектами, привнесенными $g-C_3N_4$. Так как при одинаковой площади контактов абсолютное значение емкости контрольной структуры, содержащей только пленку SiO_2 между токопроводящими электродами, и при одних и тех же условиях измерений было больше емкости экспериментальной двухслойной $g-C_3N_4/SiO_2$ -структуры, то эквивалентную электрическую схему последней можно представить в виде последовательного соединения двух конденсаторов с емкостями, соответствующими отдельно $g-C_3N_4$ и SiO_2 , и рассчитать емкостные характеристики собственно $g-C_3N_4$, которые затруднительно получить прямыми измерениями. Соответственно,

с использованием экспериментальных значений емкостей контрольной C_{SiO_2} и экспериментальной $C_{\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4}$ структур на кремнии, измеренных при напряжении 5 В на частоте 1 кГц, емкость $\text{g-C}_3\text{N}_4$ была определена следующим образом:

$$C_{\text{g-C}_3\text{N}_4} = \left[\frac{1}{C_{\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4}} - \frac{1}{C_{\text{SiO}_2}} \right]^{-1}. \quad (1)$$

По полученному значению емкости, используя формулу для емкости конденсатора с плоскими параллельными обкладками, находим:

$$C_{\text{g-C}_3\text{N}_4} = \frac{\varepsilon_{\text{g-C}_3\text{N}_4} \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{g-C}_3\text{N}_4}$ – диэлектрическая проницаемость $\text{g-C}_3\text{N}_4$; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; S – площадь верхнего электрода; d – толщина $\text{g-C}_3\text{N}_4$.

Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{g-C}_3\text{N}_4}$ при вычислении оказалась равной 14, что согласуется с ранее опубликованными данными [9], полученными для слоистой структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$. C-V-характеристики всех экспериментальных и контрольных структур на алюминиевых подложках показали отсутствие зависимости емкости от приложенного напряжения. Их типичный вид приведен на рис. 4. Абсолютные значения емкостей, представленные в табл. 1, зависят лишь от состава входящих в них пленок и частоты, на которой проводилось измерение.

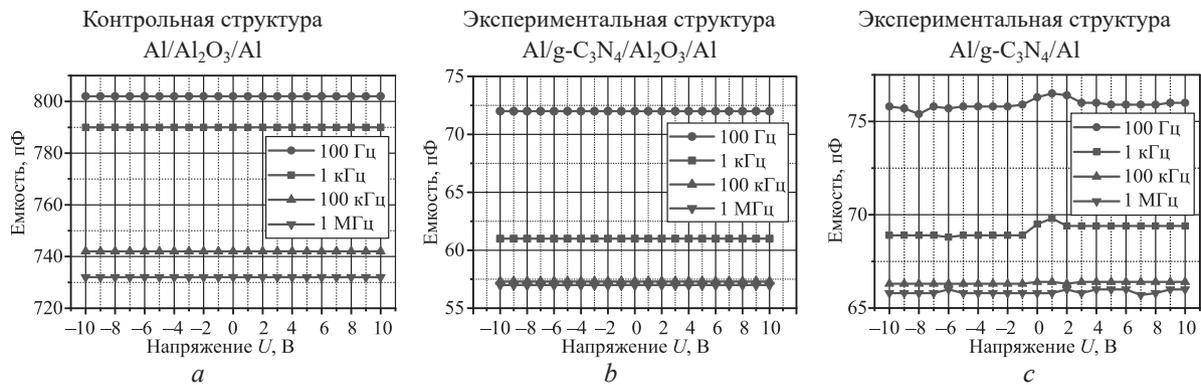


Рис. 4. C-V-характеристики контрольной (a) и экспериментальных (b, c) пленочных структур на алюминиевой подложке, сформированных осаждением $\text{g-C}_3\text{N}_4$ при 550 °C в течение 7 мин

Fig. 4. C-V characteristics of reference (a) and experimental (b, c) film structures on an aluminum substrate formed by deposition of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ at 550 °C for 7 min

Таблица 1. Электрические емкости пленочных структур на алюминиевых подложках, измеренные при напряжении 3 В на частоте 100 Гц

Table 1. Electrical capacitances of film structures on aluminum substrates measured at 3 V and 100 Hz

Режим нанесения $\text{g-C}_3\text{N}_4$	Измеренная электрическая емкость, пФ, в структурах			Рассчитанная емкость $\text{g-C}_3\text{N}_4$, пФ, в $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$
	контрольной $\text{Al/Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$	экспериментальной		
		$\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$	$\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$	
550 °C/3 мин	620 (130 нм)	99	116	118
550 °C/5 мин	640 (115 нм)	85	90	99
550 °C/7 мин	802 (100 нм)	66	76	72

Из экспериментальных значений емкостей контрольных структур ($\text{Al/Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$), приведенных в табл. 1, по методике, описанной выше, при помощи уравнения (2) с учетом $\varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 9$ [8, 9] рассчитали толщины Al_2O_3 , оставшегося на поверхности подложки, на которую $\text{g-C}_3\text{N}_4$ не осаждался. Рассчитанные величины приведены в табл. 1 в скобках. Очевидно, что эти толщины меньше толщины Al_2O_3 (210 нм) до осаждения $\text{g-C}_3\text{N}_4$.

Как и в случае структур на кремнии, емкость экспериментальных двухслойных $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ -структур оказалась меньше, чем у контрольных, содержащих только одну диэлектричес-

кую пленку Al_2O_3 . Это позволило рассчитать емкостные характеристики $\text{g-C}_3\text{N}_4$ в структурах $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ при помощи уравнения (1). Рассчитанные таким образом емкости $\text{g-C}_3\text{N}_4$ в структурах $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ приведены в табл. 1. Полученные величины удовлетворительно согласуются с экспериментально измеренными на структурах $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$. Извлеченная из них $\varepsilon_{\text{g-C}_3\text{N}_4}$ находится в пределах 9–10, что меньше значения 14, полученного в предыдущих экспериментах.

Отмеченные выше закономерности проявляются во всем исследованном частотном диапазоне 100 Гц–1 МГц. Однако наиболее ярко они выражены на низких частотах. Рис. 5 иллюстрирует относительное изменение емкости анализируемых структур от частоты приложенного напряжения. У образцов на кремниевой подложке отмечено монотонное уменьшение их емкости с увеличением значения частоты. На контрольных образцах оно наиболее существенно – до 2–3 кГц, на экспериментальных при более высоких частотах – до 10–20 кГц. Относительное снижение емкости структур, изготовленных на алюминиевой подложке, с увеличением частоты менее значительно и происходит монотонно с увеличением частоты во всем исследованном диапазоне.

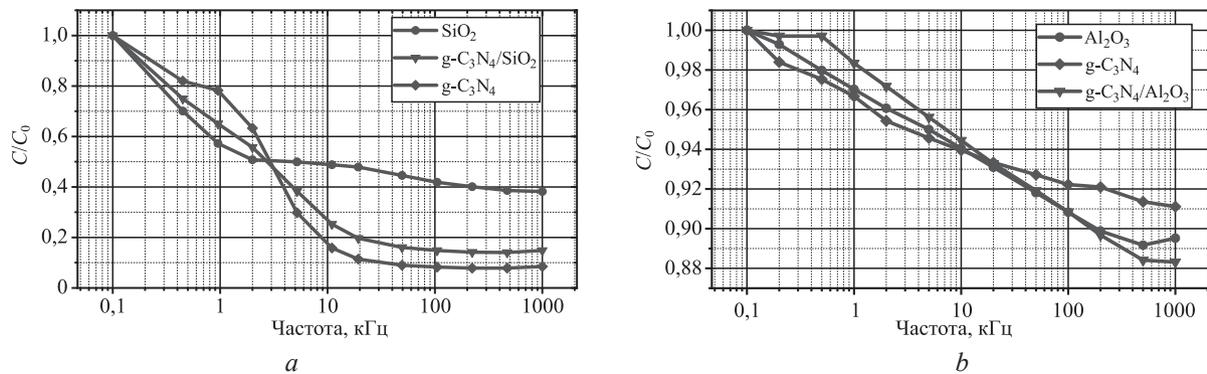


Рис. 5. Относительное изменение емкости пленочных структур на кремнии (а) и алюминии (b) в зависимости от частоты напряжения при постоянном смещении 3 В: C_0 – емкость при 100 Гц

Fig. 5. Relative change of the capacitance of film structures on silicon (a) and aluminum (b) as a function of voltage frequency at the 3 V constant bias: C_0 – capacitance at 100 Hz

Дополнительная термообработка при 120 °С уже сформированных структур с тонкопленочными алюминиевыми контактными площадками практически не приводит к изменению их емкости (рис. 6). При этом характер частотной зависимости емкости, состоящий в монотонном ее уменьшении по мере увеличения частоты, не меняется.

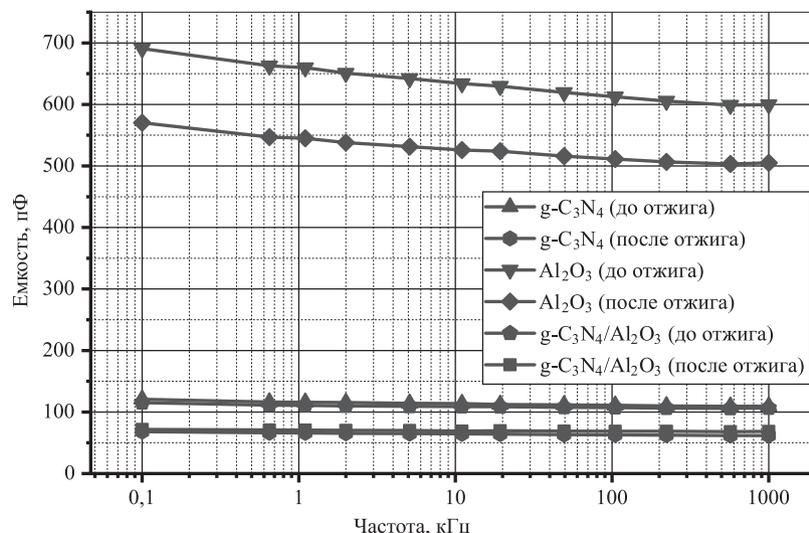


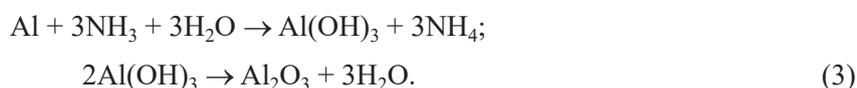
Рис. 6. Частотная зависимость емкости пленочных структур с $\text{g-C}_3\text{N}_4$ на алюминии до и после отжига при 120 °С

Fig. 6. Frequency dependence of the capacitance of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ films on aluminum before and after annealing at 120 °С

Установившиеся значения емкостей и характер их частотной зависимости остаются практически неизменными даже после хранения отожженных образцов на воздухе при комнатной температуре в течение не менее 72 ч.

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные позволяют уточнить представления о реальном составе сформированных пленочных структур. В первую очередь обращает на себя внимание факт наличия на рентгенограммах структур Al/g-C₃N₄/Al дифракционных пиков, соответствующих гексагональному Al₂O₃. Поскольку аналогичных сигналов от структур на кремниевой подложке, у которых алюминий присутствует только в верхних контактах, не зарегистрировано, целесообразно заключить, что это соединение образовалось на границе g-C₃N₄ с алюминиевой подложкой в процессе его высокотемпературного осаждения. Известно [10], что при преобразовании меланина в g-C₃N₄ выделяется аммиак (NH₃), взаимодействие которого с алюминием в присутствии паров воды при повышенной температуре может приводить к образованию Al₂O₃:



Нельзя исключать и образование нитрида алюминия AlN



К сожалению, однозначно идентифицировать присутствие этого широкозонного полупроводника в исследуемых структурах не представляется возможным, поскольку положения его основных дифракционных пиков (36,16 град в направлении (002) и 38,02 град в направлении (101)) на рентгенограммах практически совпадают с пиками от Al₂O₃ (36,21 град в направлении (104) и 38,06 град в направлении (110)). На химическую активность выделяющегося аммиака указывает и уменьшение толщины ранее сформированной пленки Al₂O₃ на части образца, на которую g-C₃N₄ не осаждался (табл. 1). Так, если Al₂O₃, образующийся на границе g-C₃N₄/Al, оказывается защищенным от воздействия аммиака слоем g-C₃N₄, то в незащищенной части возможно его травление с последующим испарением продуктов реакции:



Образование Al₂O₃ на границе с g-C₃N₄, осажденного на алюминиевую подложку, объясняет пониженное значение диэлектрической проницаемости g-C₃N₄, рассчитанной из проведенных емкостных измерений, поскольку относится не к самому материалу, а к двухслойной пленочной структуре g-C₃N₄/Al₂O₃.

Частотные зависимости емкости изготовленных структур свидетельствуют об определяющей роли медленных механизмов релаксации находящихся в них зарядов. Наиболее вероятной их локализацией являются границы раздела g-C₃N₄. Присутствие в осажденном материале значительного количества атомов кислорода (до нескольких атомарных процентов), о чем сообщалось в [5], позволяет предположить, что эти зарядовые состояния связаны именно с кислородом, который собирается на границах раздела. Причем в структурах на алюминиевой подложке концентрация таких зарядовых состояний меньше, чем в структурах на кремниевой подложке, что, вероятно, связано с образованием геттерирующего кислород слоя Al₂O₃ между осаждаемым g-C₃N₄ и алюминием подложки. Незначительное уменьшение абсолютных значений емкости экспериментальных структур при остающемся неизменным характере их частотной зависимости после низкотемпературного (120 °С) отжига (рис. 6) говорит об адсорбции на их поверхности чужеродных атомов и молекул с низкой энергией связи с основными материалами этих структур. Удаление этих частиц термообработкой носит необратимый характер.

Заключение

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о существенной роли в емкостных свойствах пленочных структур, содержащих g-C₃N₄, зарядовых состояний на границах этого

материала с материалом подложки. Поскольку синтез $g\text{-C}_3\text{N}_4$ из меламина сопровождается выделением значительного количества аммиака, следует считаться с возможностью его химического взаимодействия с материалом подложки. В частности, при его взаимодействии в присутствии паров воды с алюминием возможно образование Al_2O_3 на границе $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$, что подтверждают данные рентгенодифракционного анализа. Не следует исключать такого рода взаимодействия и с другими материалами подложек, что требует последующих углубленных исследований.

Список литературы

1. Chen, Y. Graphitic Carbon Nitride Nanomaterials for High Performance Supercapacitors / Y. Chen, C. Lu // *Carbon Neutralization*. 2023. Vol. 2, No 5. P. 585–602. DOI: 10.1002/cnl2.87.
2. Thermal Vapor Condensation of Uniform Graphitic Carbon Nitride Films with Remarkable Photocurrent Density for Photoelectrochemical Applications / J. Bian [et al.] // *NanoEnergy*. 2015. Vol. 15. P. 353–361. DOI: 10.1016/j.nanoen.2015.04.012.
3. Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Layered Films / E. B. Chubenko [et al.] // *J. Phys. Chem.* 2022. Vol. 126, No 9. P. 4710–4714. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c10561.
4. CVD-синтез пленок графитоподобного нитрида углерода из меламина / Е. Н. Ермакова [и др.] // *Журнал неорганической химии*. 2023. Т. 68, № 2. С. 56–64.
5. Rapid Chemical Vapor Deposition of Graphitic Carbon Nitride Films / E. B. Chubenko [et al.] // *Materialia*. 2023. Vol. 28. DOI: 10.1016/j.mtla.2023.101724.
6. Боброва, Е. А. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП-структур, обусловленные зарядом в окисле / Е. А. Боброва, Н. М. Омеляновская // *Физика и техника полупроводников*. 2008. Т. 42. № 11. С. 1380–1383.
7. Кремниевые МОП-структуры с нестехиометрическими металлоксидными полупроводниками / Е. А. Тутов [и др.] // *Журнал технической физики*. 2006. Т. 76. № 12. С. 65–68.
8. Особенности измерения диэлектрической проницаемости тонких пленок МДП-структур / К. А. Воротилов [и др.] // *Вестник науки Сибири*. 2011. Т. 1, № 1. С. 220–228.
9. Patra, P. C. Dielectric Constant of Thin Film Graphitic Carbon Nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) and Double Dielectric $\text{Al}_2\text{O}_3/g\text{-C}_3\text{N}_4$ / P. C. Patra, Y. N. Mohapatra // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 118, No 10. DOI: 10.1063/5.0045911.
10. Graphitic Carbon Nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$)-Based Photocatalysts for Artificial Photosynthesis and Environmental Remediation: Are We a Step Closer to Achieving Sustainability? / W. J. Ong [et al.] // *Chem. Rev.* 2016. Vol. 116, No 12. DOI: 10.1039/D3SU00382E.

References

1. Chen Y., Lu C. (2023) Graphitic Carbon Nitride Nanomaterials for High Performance Supercapacitors. *Carbon Neutralization*. 2 (5), 585–602. DOI: 10.1002/cnl2.87.
2. Bian J., Li Q., Huang C., Li J., Guo Y., Zaw M., et al. (2015) Thermal Vapor Condensation of Uniform Graphitic Carbon Nitride Films with Remarkable Photocurrent Density for Photoelectrochemical Applications. *NanoEnergy*. 15, 353–361. DOI: 10.1016/j.nanoen.2015.04.012.
3. Chubenko E. B., Kovalchuk N. G., Komissarov I. V., Borisenko V. E. (2022) Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Layered Films. *J. Phys. Chem.* 126 (9), 4710–4714. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c10561.
4. Ermakova E. N., Maksimovsky E. A., Yushina I. V., Kosinova M. L. (2023) CVD Synthesis of Graphitic Carbon Nitride Films from Melamine. *Journal of Inorganic Chemistry*. 68 (2), 56–64 (in Russian).
5. Chubenko E. B., Maximov S. E., Bui C. D., Borisenko V. E., Pham V. T. (2023) Rapid Chemical Vapor Deposition of Graphitic Carbon Nitride Films. *Materialia*. 28. DOI: 10.1016/j.mtla.2023.101724.
6. Bobrova E. A., Omelyanovskaya N. M. (2008) Capacitance-Voltage Characteristics of MOS Structures Caused by Charge in the Oxide. *Physics and Technology of Semiconductors*. 42 (11), 1380–1383 (in Russian).
7. Tutov E. A., Ryabtsev S. V., Tutov E. E., Bormontov E. N. (2006) Silicon MOS Structures with Nonstoichiometric Metal Oxide Semiconductors. *Journal of Technical Physics*. 76 (12), 65–68 (in Russian).
8. Vorotylov K. A., Luchnikov P. A., Podgorny V. U., Seregin D. S. (2011) Features of Measuring the Permittivity of Thin Films of MIS Structures. *Bulletin of Science of Siberia*. 1 (1), 220–228 (in Russian).
9. Patra P. C., Mohapatra Y. N. (2021) Dielectric Constant of Thin Film Graphitic Carbon Nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) and Double Dielectric $\text{Al}_2\text{O}_3/g\text{-C}_3\text{N}_4$. *Appl. Phys. Lett.* 118 (10). DOI: 10.1063/5.0045911.
10. Ong W. J., Tan L. L., Ng Y. H., Yong S. T., Chai S. P. (2016) Graphitic Carbon Nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$)-Based Photocatalysts for Artificial Photosynthesis and Environmental Remediation: Are We a Step Closer to Achieving Sustainability? *Chem. Rev.* 116 (12). DOI: 10.1039/D3SU00382E.

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Фам В. Т., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Максимов С. Е., студ. БГУИР

Уткина Е. А., канд. техн. наук, доц., доц. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Чубенко Е. Б., д-р. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Борисенко В. Е., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 25 792-66-37
E-mail: v.tu2103@gmail.com
Фам Ван Тунг

Information about the authors

Pham V. T., Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Maximov S. E., Student, BSUIR

Utkina E. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Chubenko E. B., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Borisenko V. E., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 25 792-66-37
E-mail: v.tu2103@gmail.com
Pham Van Tung